

# J-PARC MR Beam Position Monitor

高エネルギー加速器研究機構  
加速器研究施設 加速器第一研究系  
モニターGr.  
久保木浩功

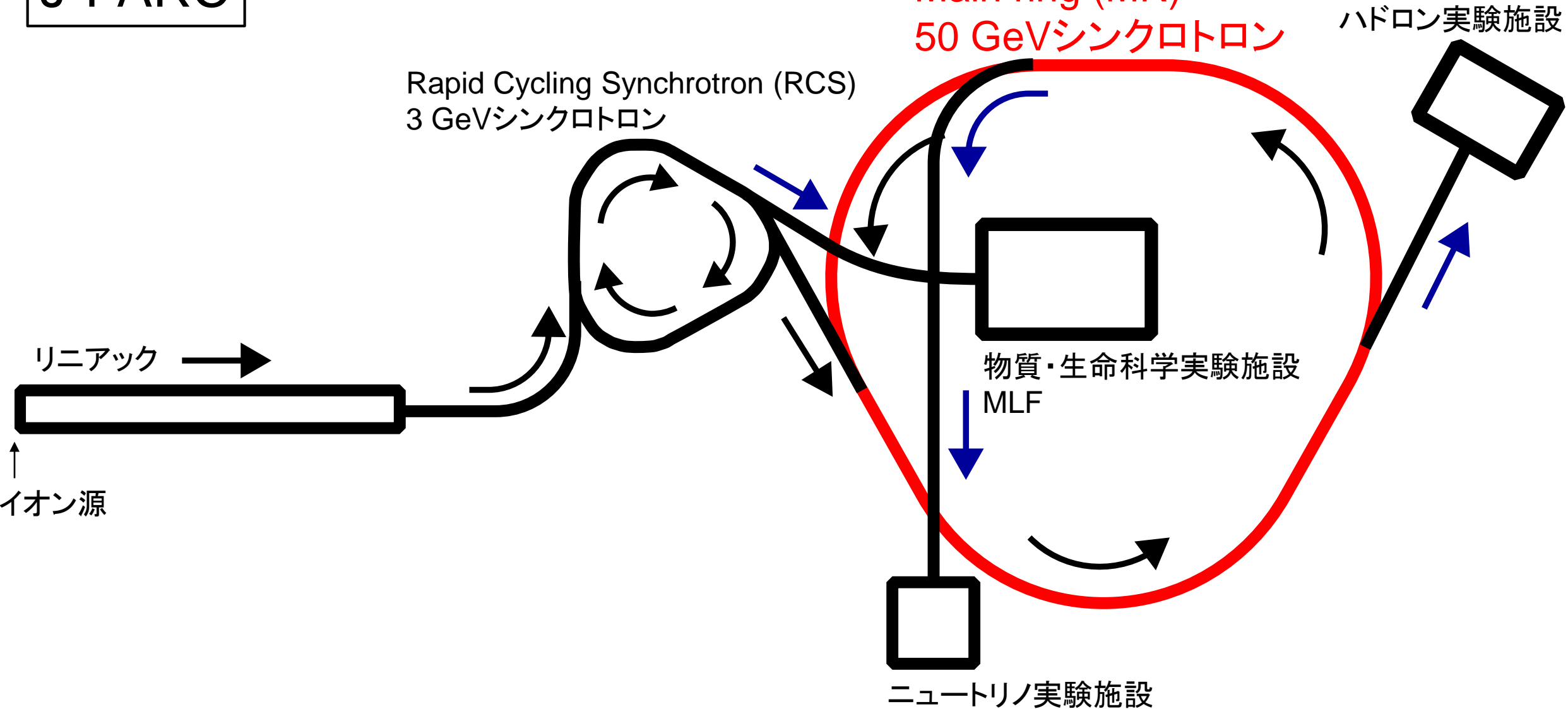
- J-PARC Main RingのBPM測定システム
- BPMのゲイン較正(Beam Based Gain Calibration (BBGC))

外山毅、畠山衆一郎<sup>A</sup>、高野淳平、手島昌己

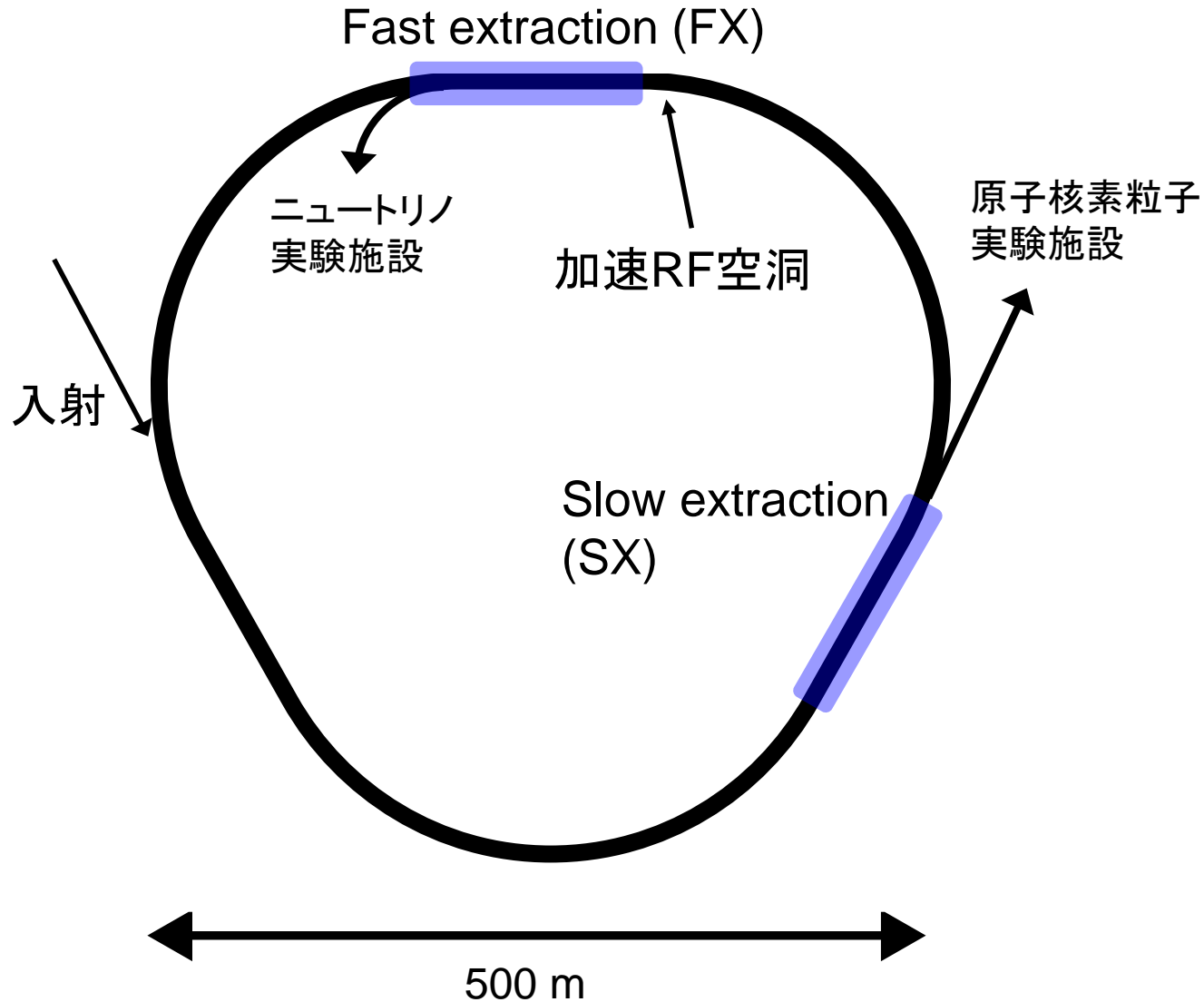
高エネルギー加速器研究機構

<sup>A</sup>日本原子力研究開発機構

# J-PARC



**Main ring (MR)**  
**50 GeVシンクロトロン**

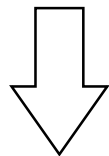


周長	1568 m
エネルギー	3-30 GeV
$\beta$	0.9715-0.9995
Lorentz $\gamma$	4.22-33.21
ハーモニク数	9
バンチ数	8
周回周期	5.38-5.23 $\mu$ sec
RF周波数	1.67-1.72 MHz
バンチ長(時間)	70~200 nsec
バンチ長(空間長)	20~60 m
チューン	FX: $v_x=22.40$ , $v_y=20.75$ SX: $v_x=22.30$ , $v_y=20.78$
<b>BPM数</b>	<b>186台 (1台/7-8 m)</b>

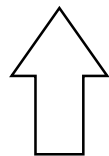
**安定したビーム軌道が必要**

# Beam Position Monitor (BPM)の役割

- Closed Orbit Distortion (COD)の測定
- ベータatron振動数、色収差(Chromaticity)の測定
- ターン毎のビーム位置測定

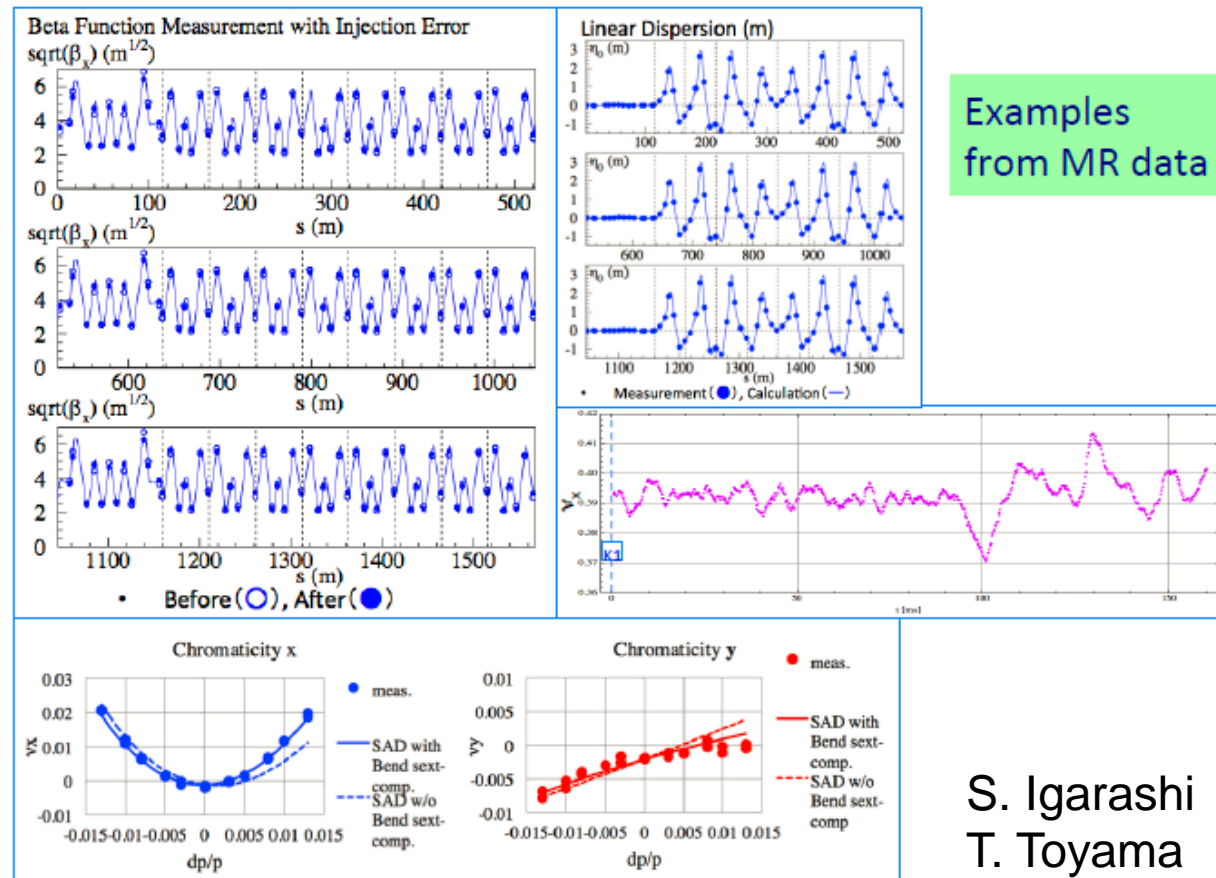


ビーム軌道の安定化、ビームロス軽減を目的



要求精度は数100  $\mu\text{m}$ 以下 [1]

[1] S. Machida, ATAC05 (2005).



# J-PARCのBeam Position Monitor (BPM)

対角線カット型電極  
Electrode shape:  
"diagonal cut"

Horizontal  
**Electrode L**

Beam

Vertical

**U**

**D**

**R**

$v_R$

$v_L$

$v_U$

$v_D$

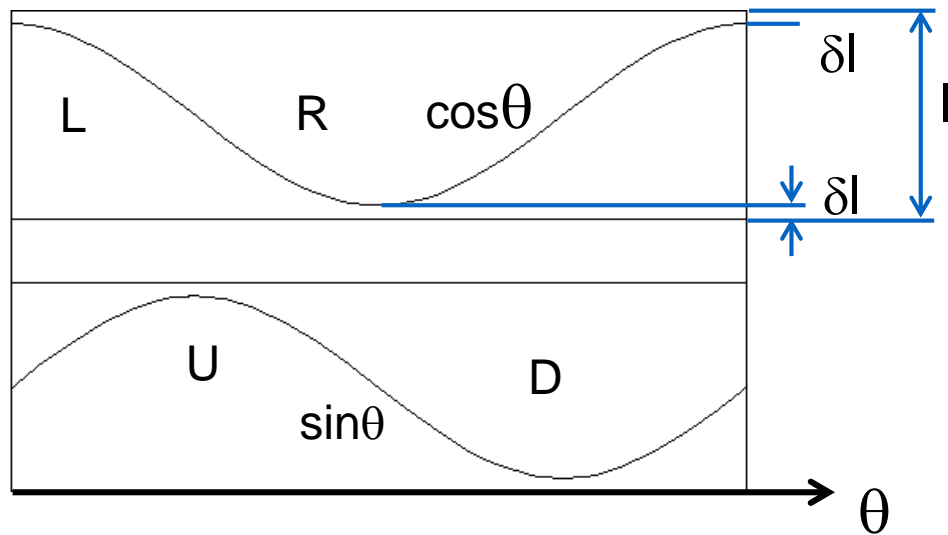
cable

cable

BPM processing circuit (BPMC)

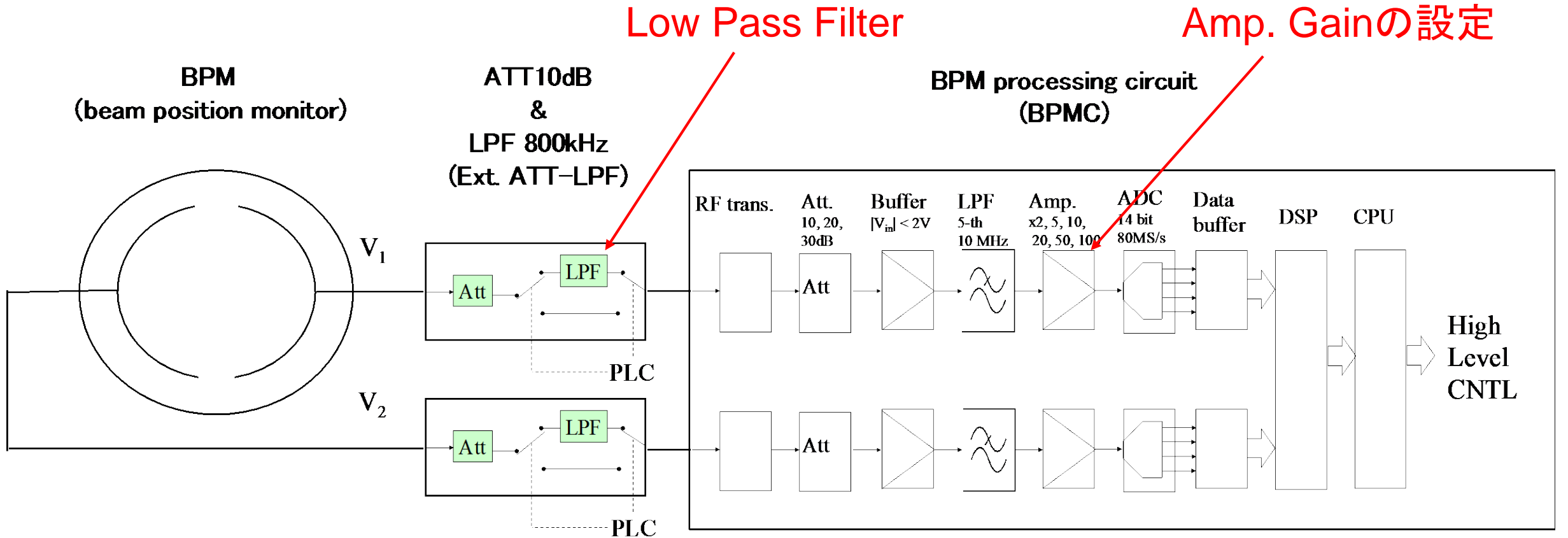
**$V_L, V_R, V_U, V_D$**

電極の展開図



T. Toyama

# BPM測定システム図



ビーム強度によって異なる処理回路設定

T. Toyama

## 位置情報の取得

$$\left\{ \begin{array}{l} V_L = \lambda g_L \left( 1 + \frac{x}{a} \right) \\ V_R = \lambda g_R \left( 1 - \frac{x}{a} \right) \\ V_U = \lambda g_U \left( 1 + \frac{y}{a} \right) \\ V_D = \lambda g_D \left( 1 - \frac{y}{a} \right) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{V_L/g_L - V_R/g_R}{V_L/g_L + V_R/g_R} a \\ y = \frac{V_U/g_U - V_D/g_D}{V_U/g_U + V_D/g_D} a \end{array} \right.$$

$g_L, g_R, g_U, g_D$	各電極からの応答ゲインをL電極のゲイン(= $g_L$ )で割ったもの。 $g_L=1$ 。
$V_L, V_R, V_U, V_D$	各電極L,R,U,Dからの出力電圧
$\lambda$	BPMを通過する線電荷(ビーム)
$x, y$	水平、垂直方向のビーム位置
$a$	BPM中心から電極内面の実効半径

### BPMの位置情報の誤差

#### Beam Based Alignment (BBA) [2]

(1) BPMの位置の誤差を包括的に補正  
(設置誤差、電極位置の誤差等)  
→有用だが測定が非常に大変(数日)

(2) ゲインの誤差  
(信号伝送系、処理回路の個体差)

#### Beam Based Gain Calibration (BBGC) [3]

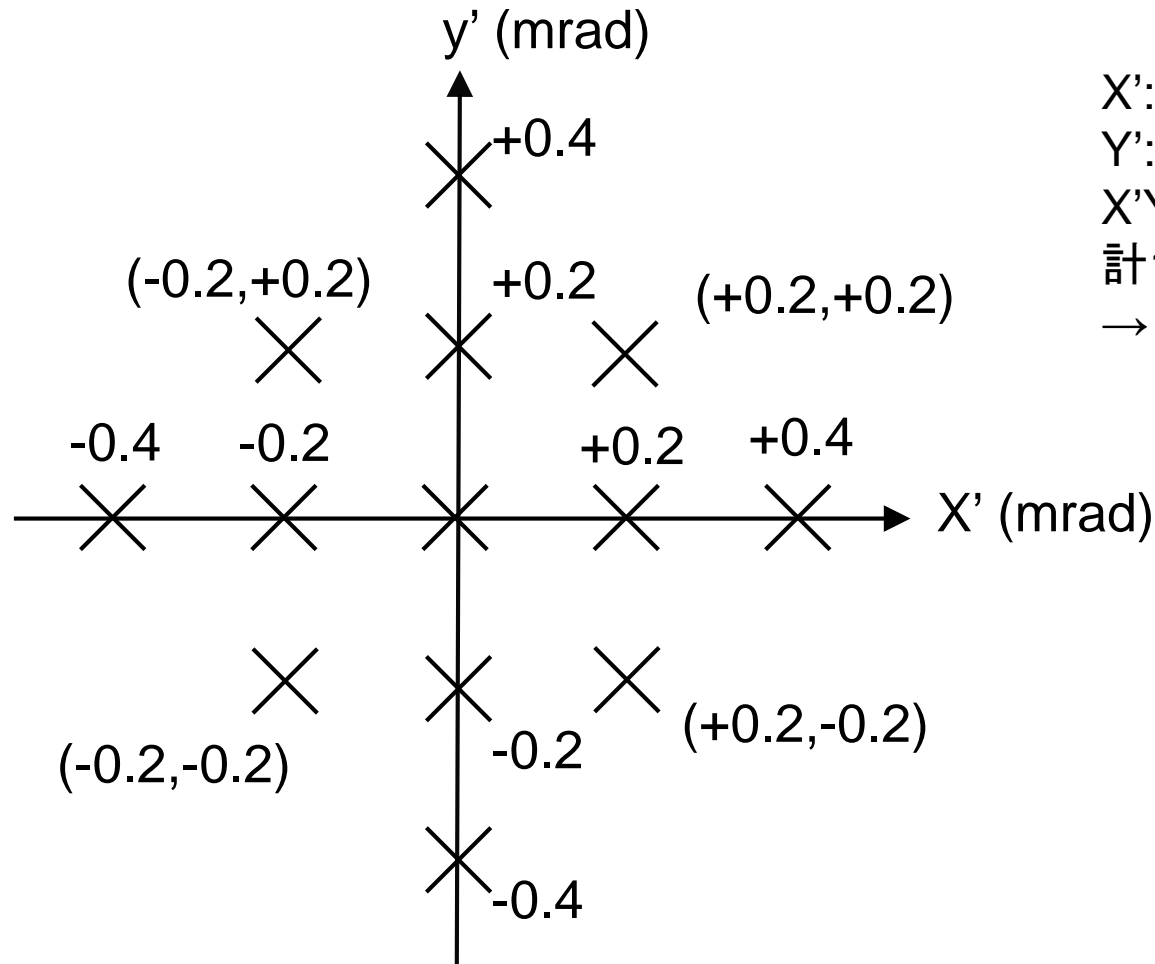
→比較的容易にデータ取得可能(数時間)

[2] T. Toyama et al., 日本加速器学会第11回年会 (2014).

[3] K. Satoh and M. Tejima, Proc. of PAC95, p. 2479 (1995).

## BBGC (Beam Based Gain Calibration)

- 1) ステアリング磁石で閉軌道にキックを加え、振動振幅が大きい軌道を生成
- 2) 電極からの出力電圧は左右、上下の位置によって変化するため、複数の振幅のデータを取得(複数の出力電圧のデータ、下図)
- 3) 各電極からの出力電圧を最もよく再現するようにゲイン( $g_L, g_R, g_U, g_D$ )を決める。



$X'$ : 5点

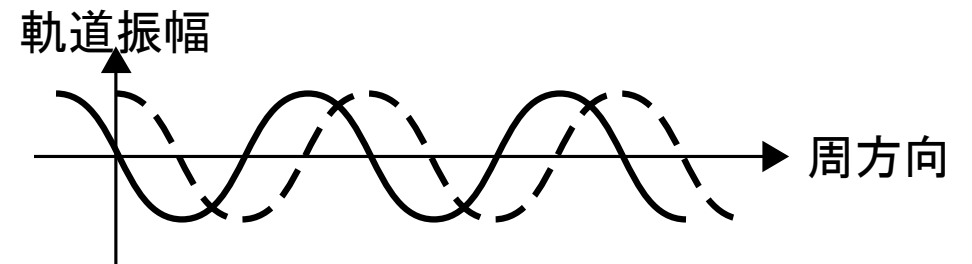
$Y'$ : 5点

$X'Y'$ : 4点

計14点の設定で10shotずつ

→ **14点 × 10shot × 2セット = 280個**のデータセットを取得

※1か所のステアリングによるキックでは位置が変化しない場所(振動の節)があるため、位相がずれたデータも取得





## BBGCデータ解析手順

$$\left\{ \begin{array}{l} V_L = \lambda g_L \left( 1 + \frac{x}{a} \right) \\ V_R = \lambda g_R \left( 1 - \frac{x}{a} \right) \\ V_U = \lambda g_U \left( 1 + \frac{y}{a} \right) \\ V_D = \lambda g_D \left( 1 - \frac{y}{a} \right) \end{array} \right. \xrightarrow{x,y,a \text{ 消去}} \left\{ \begin{array}{l} \lambda = \frac{1}{2} \left( \frac{V_L}{g_L} + \frac{V_R}{g_R} \right) \\ \lambda = \frac{1}{2} \left( \frac{V_U}{g_U} + \frac{V_D}{g_D} \right) \end{array} \right. \xrightarrow{\lambda \text{ 消去}} V_L = -\frac{1}{g_R} V_R + \frac{1}{g_U} V_U + \frac{1}{g_D} V_D \quad (g_L = 1)$$

表記を簡単化  $-\frac{R}{g_R} + \frac{U}{g_U} + \frac{D}{g_D} = L$

- データ点m個の連立方程式ができる

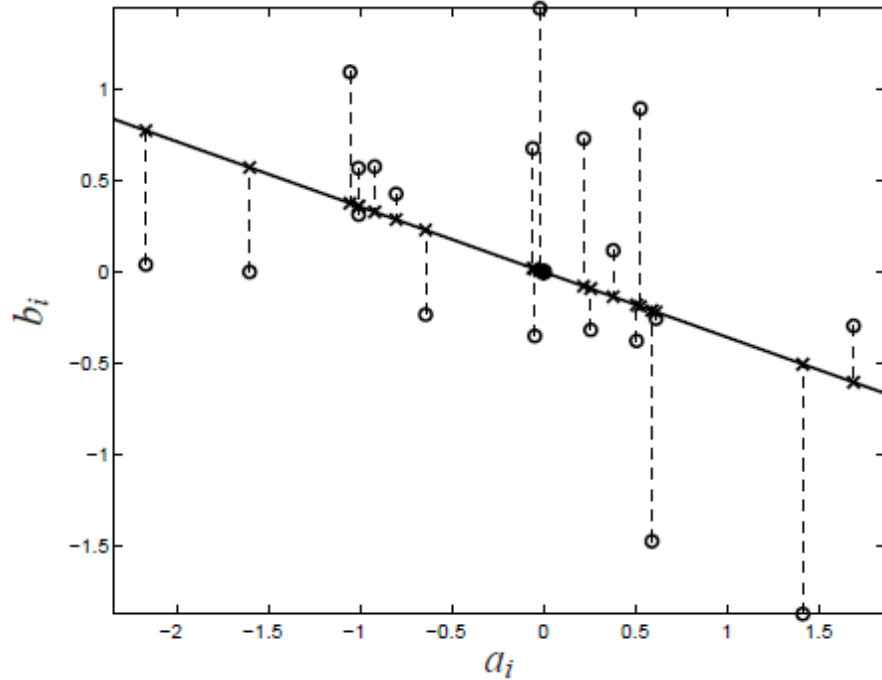
$$\begin{pmatrix} -R_1 & U_1 & D_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -R_m & U_m & D_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/g_R \\ 1/g_U \\ 1/g_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_m \end{pmatrix}$$

**A**                      **x**                      **b**

正規方程式  $A \cdot x = b$  を解くことに帰着

# 正規方程式の解法

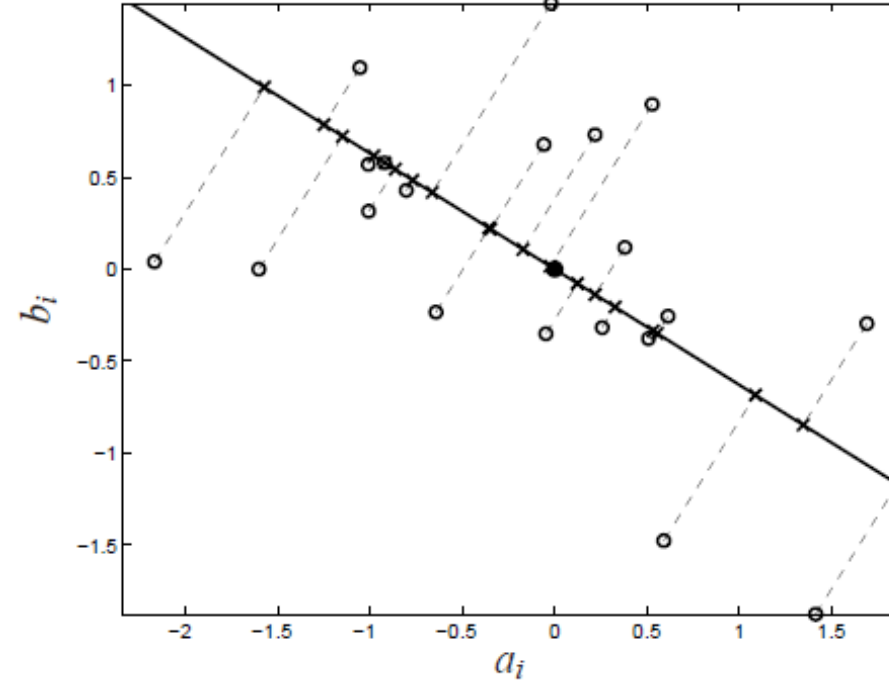
## (1) 最小二乗法 (Least Square Fitting, LS)



最小にするもの: 残差 $\Delta R$

$$\Delta R = \sum_{j=1}^m \left( -\frac{R_j}{g_R} + \frac{U_j}{g_U} + \frac{D_j}{g_D} - L_j \right)^2$$

## (2) 全最小二乗法 (Total Least Square Fitting, TLS)



最小にするもの: データとモデルとの距離  $\Delta D$

$$\Delta D = \frac{1}{\|\mathbf{G}_\perp\|^2} \sum_{j=1}^m \left( -\frac{R_j}{g_R} + \frac{U_j}{g_U} + \frac{D_j}{g_D} - L_j \right)^2$$

$$\mathbf{G}_\perp = \left( -1, -\frac{1}{g_R}, \frac{1}{g_U}, \frac{1}{g_D} \right) \quad \mathbf{G}_\perp: \text{L,R,U,D空間上での平面の式}$$

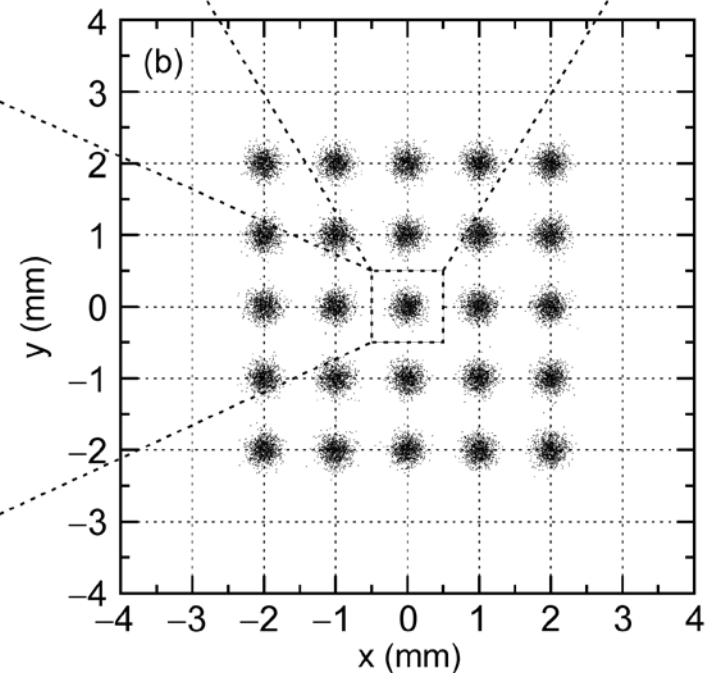
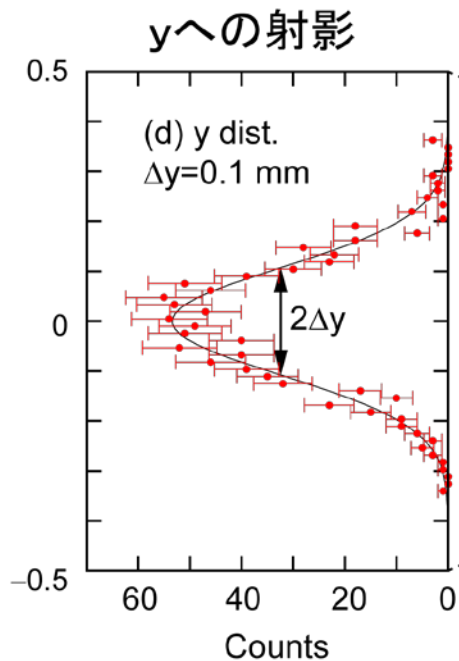
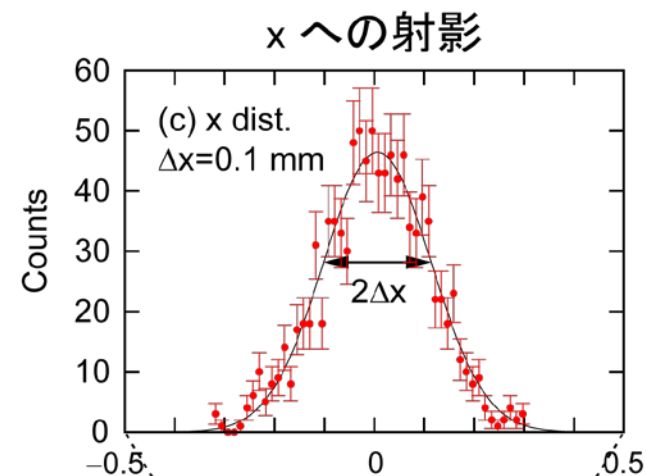
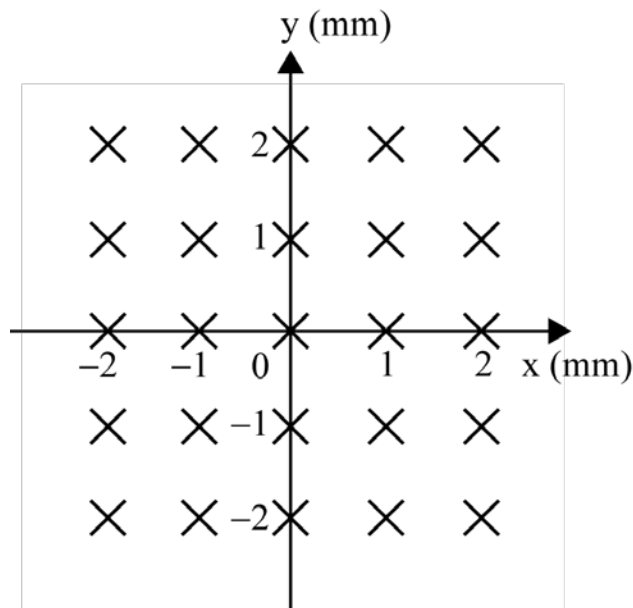
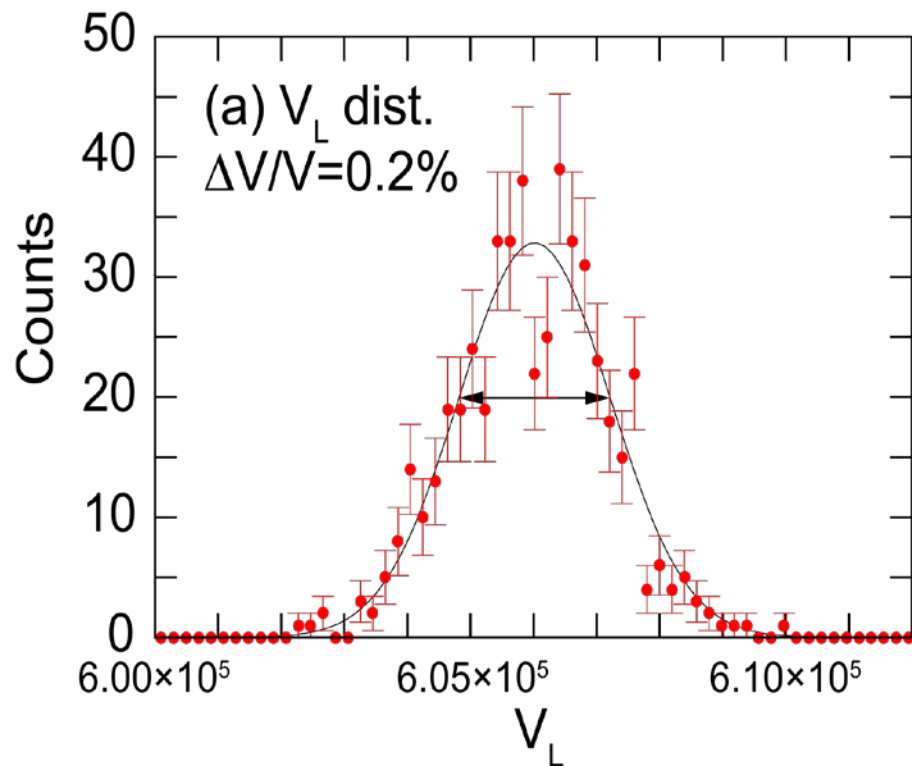
$$-L - \frac{R}{g_R} + \frac{U}{g_U} + \frac{D}{g_D} = 0$$

に対する法線ベクトル

# シミュレーション

条件:

- ゲインの設定:  
( $g_L, g_R, g_U, g_D$ ) = (1.00, 1.01, 1.005, 0.975)
- $-2 \leq x \leq 2, -2 \leq y \leq 2$ の25点でデータを生成
- $V_L, V_R, V_U, V_D$ に対し、  
 $\Delta V/V = 0.2\%$ のガウス分布に従うノイズを生成
- 位置1点あたり500点のデータ生成



## フィッティング解析結果

	$g_R$	$g_U$	$g_D$
True	1.010	1.005	0.975
LS	1.034	1.015	0.988
TLS	1.012	1.005	0.977

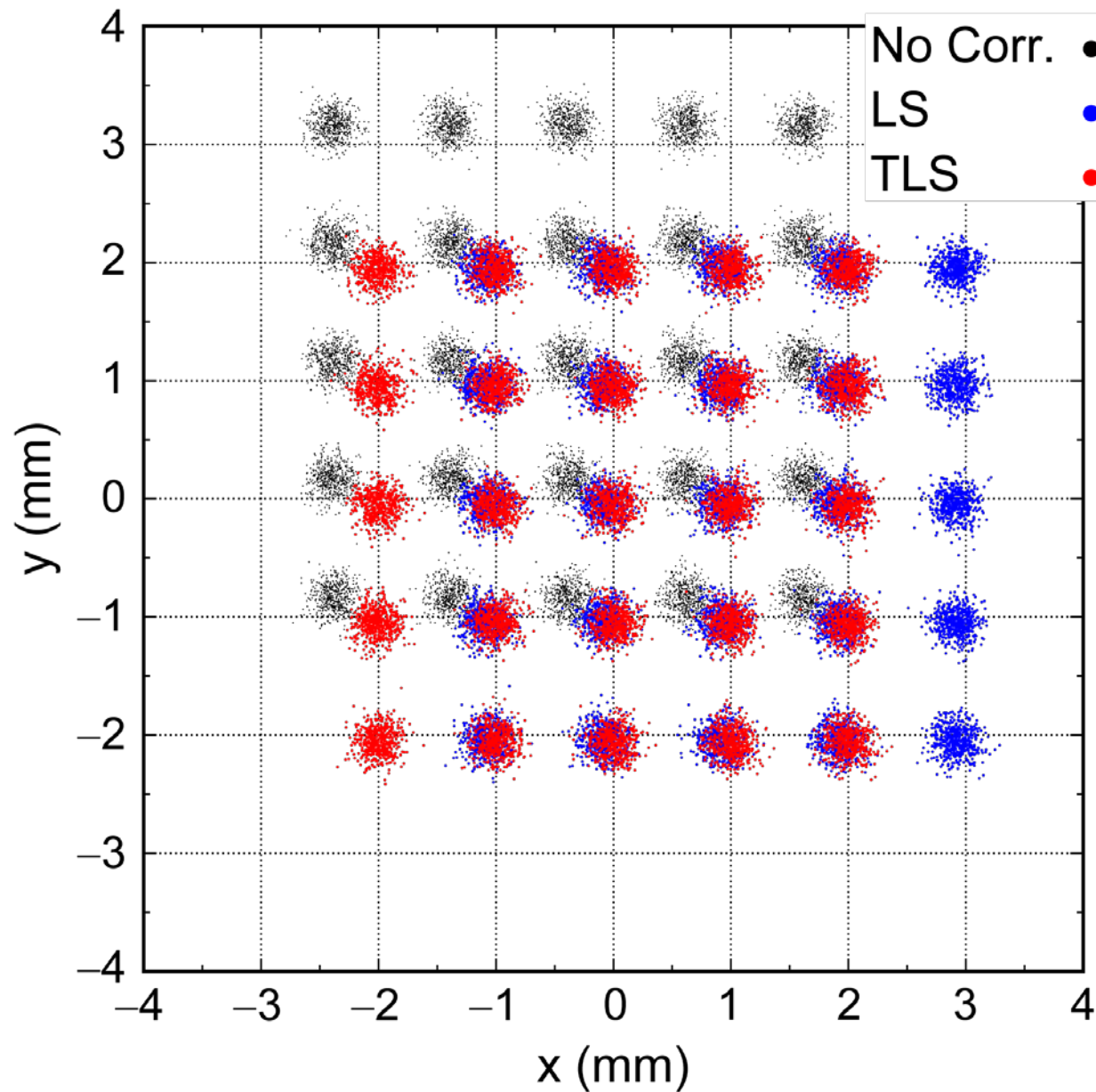
LS: Least Square Fitting

TLS: Total Least Square Fitting

データ点  $m=25 \times 500=12500$

$$\begin{pmatrix} -R_1 & U_1 & D_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -R_m & U_m & D_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/g_R \\ 1/g_U \\ 1/g_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_m \end{pmatrix}$$

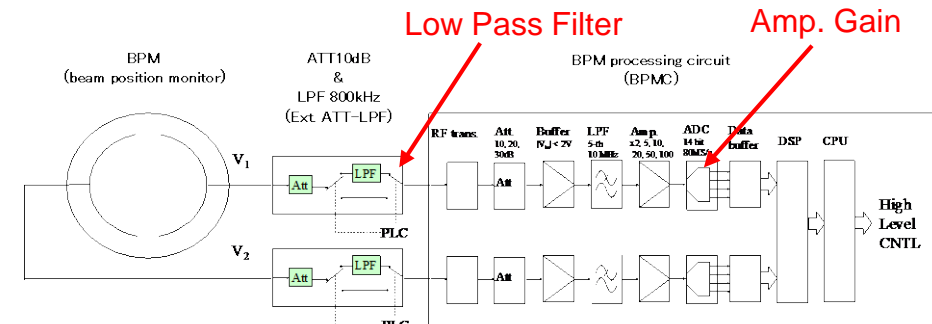
TLSの適用が有効であることが示された。



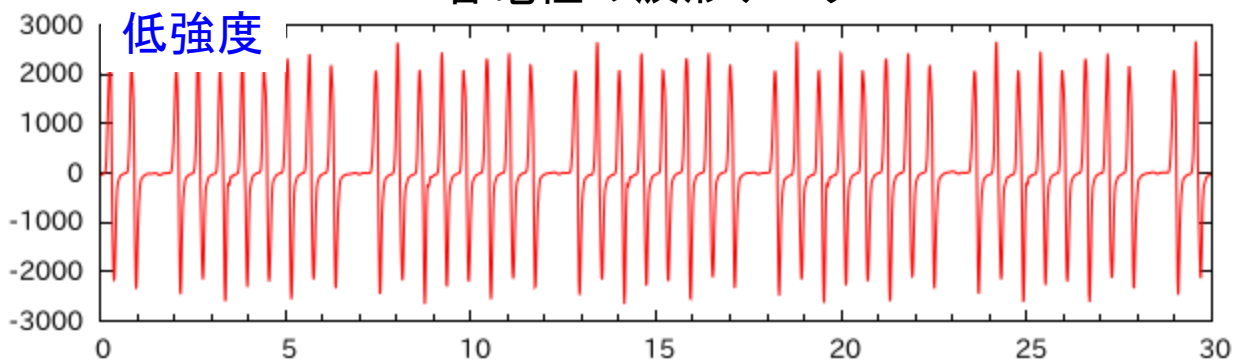
# 実際のデータ解析

- ゲインは処理回路の設定によって変動する

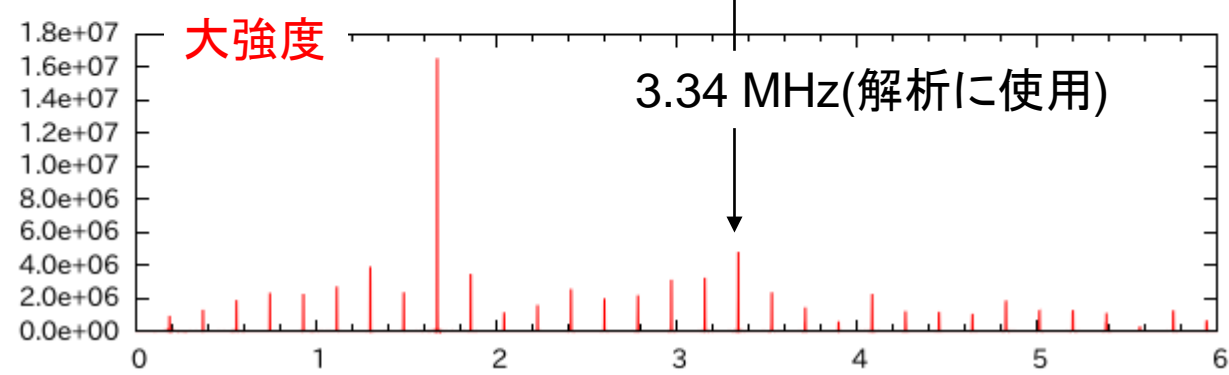
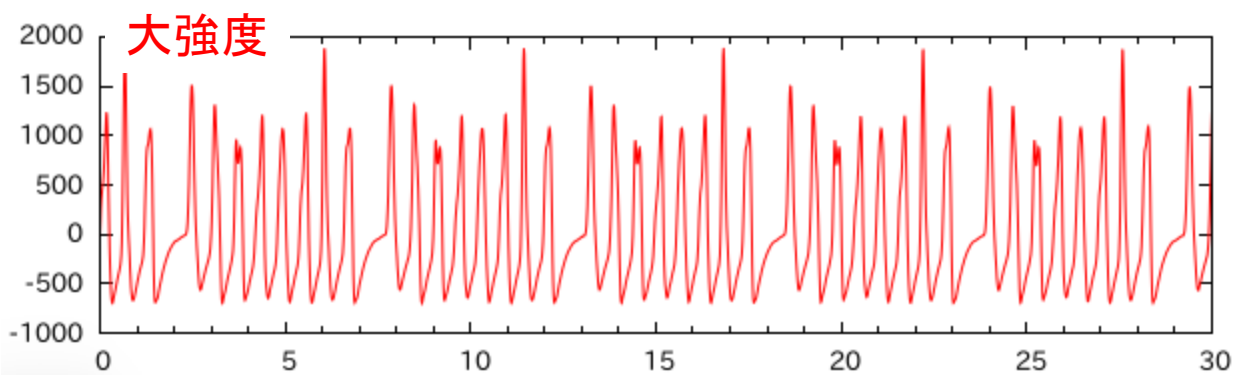
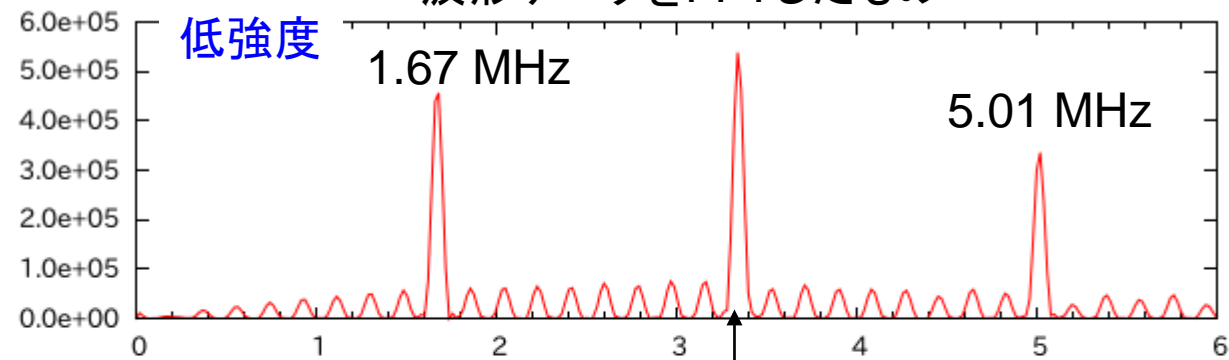
	粒子数 Proton/8-bunch	Amp. gain	Low Pass Filter
低強度	$2 \times 10^{13}$	$\times 5$	OFF
大強度	$1 \times 10^{14}$	$\times 2$	ON



各電極の波形データ



波形データをFFTしたもの



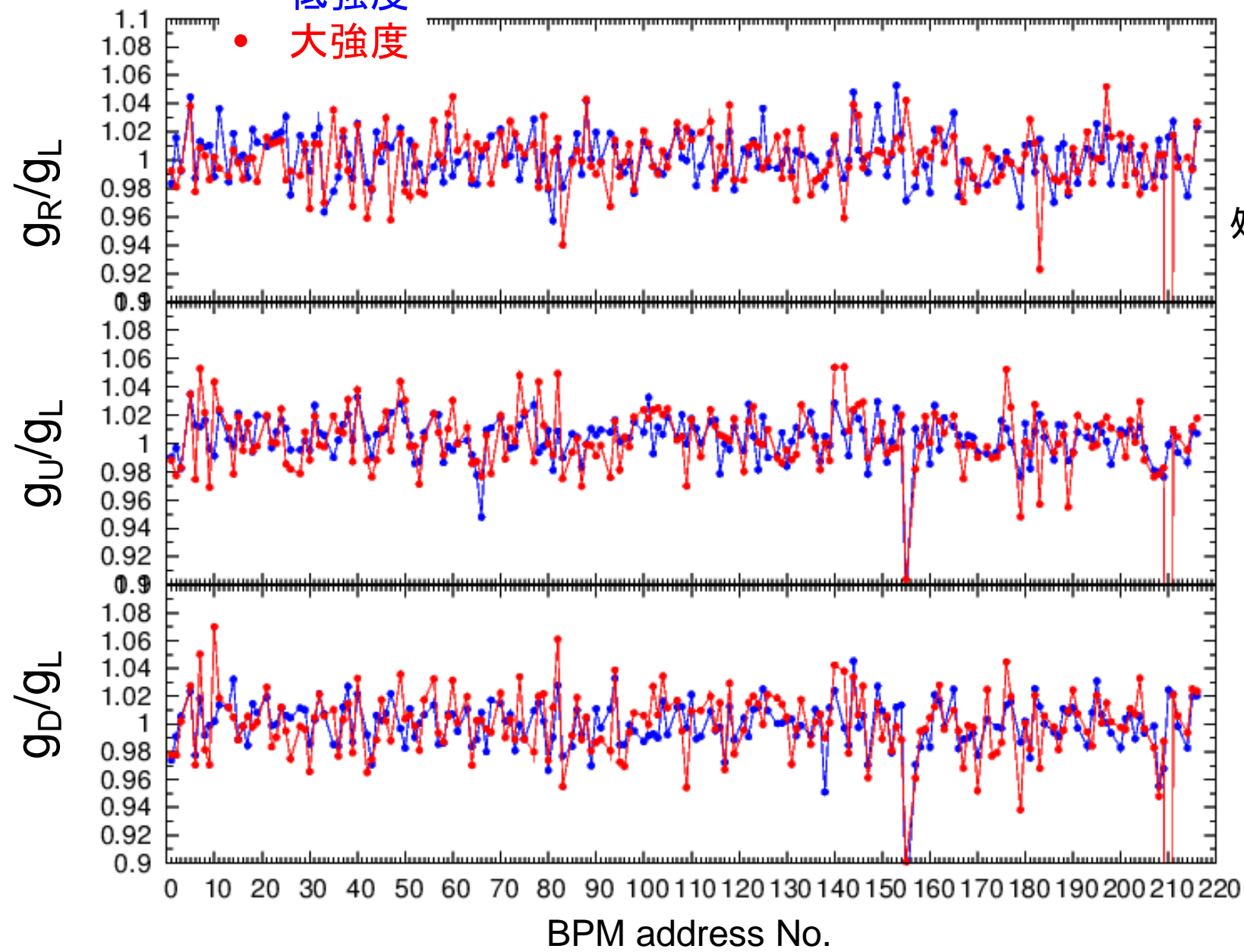
時間 (μsec)

周波数 (MHz)

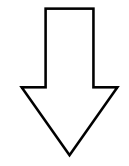
FFT後のスペクトル3.34 MHzのピークを出力電圧L,R,U,Dとしてゲインを算出

ゲイン解析結果

● 低強度  
● 大強度



処理回路の違いで最大数%の差異

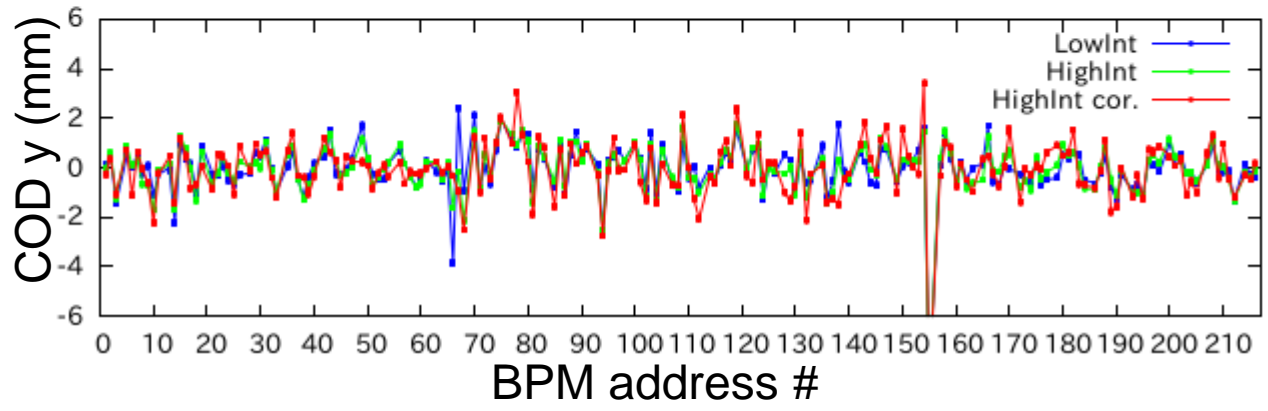
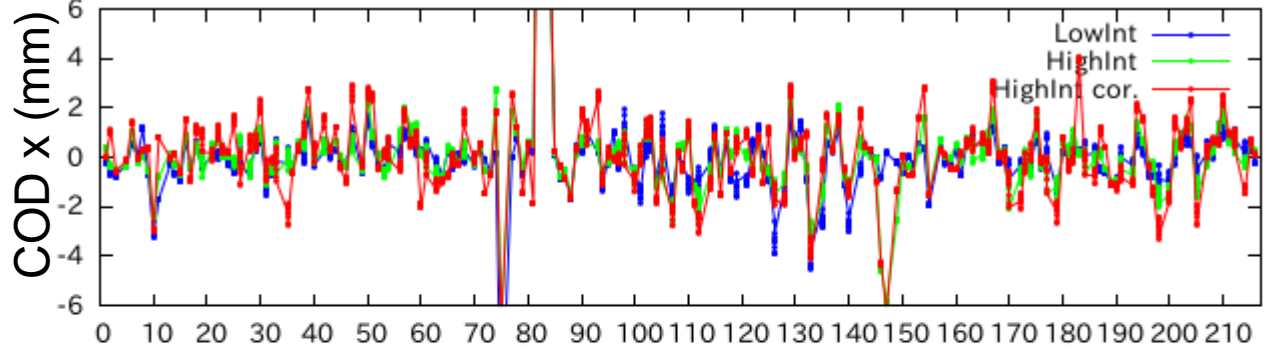


ビーム強度によって  
ゲイン較正の必要性

# ゲイン結果の妥当性

- 異なるビーム強度でのCODデータに対し、root mean square (r.m.s.) =  $\sqrt{\sum x_i^2 / n}$  でゲインの妥当性を評価

ビーム軌道: 低強度、大強度(補正なし)、大強度(補正あり)



$$\begin{pmatrix} x_{MON} \\ y_{MON} \end{pmatrix}_{Low} = R \begin{pmatrix} x_{beam} \\ y_{beam} \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} \Delta x_{BPM0} \\ \Delta y_{BPM0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x_{MON0} \\ \Delta y_{MON0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x_{gain} \\ \Delta y_{gain} \end{pmatrix}_{Low}}_{\text{ゲインの補正}} \end{pmatrix}$$

$$= R \begin{pmatrix} x_{beam} \\ y_{beam} \end{pmatrix}_{Low} + \begin{pmatrix} \Delta x_{BBA} \\ \Delta y_{BBA} \end{pmatrix}_{Low}$$

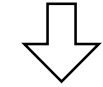
$$\begin{pmatrix} x_{beam} \\ y_{beam} \end{pmatrix}_{Low} \approx R' \begin{pmatrix} x_{MON} \\ y_{MON} \end{pmatrix}_{Low} - \begin{pmatrix} \Delta x_{BBA} \\ \Delta y_{BBA} \end{pmatrix}_{Low}$$

$$\begin{pmatrix} x_{beam} \\ y_{beam} \end{pmatrix}_{High} = R' \begin{pmatrix} x_{MON} \\ y_{MON} \end{pmatrix}_{Low} - \begin{pmatrix} \Delta x_{BBA} \\ \Delta y_{BBA} \end{pmatrix}_{Low} + \begin{pmatrix} \Delta x_{gain} \\ \Delta y_{gain} \end{pmatrix}_{Low} - \begin{pmatrix} \Delta x_{gain} \\ \Delta y_{gain} \end{pmatrix}_{High}$$

ゲインの違いによる補正

		r.m.s. x (mm)	r.m.s. y (mm)
低強度データ(目標値)	BBA後	2.395	1.320
大強度データ	補正なし	2.336	1.385
	補正あり	2.379	1.450

BBA後 < 補正なし > 補正あり  
 となってほしかったが、..



オフラインでの補正データとの  
 切り分けの必要

## まとめ

- J-PARC MRではビーム軌道測定用に186台のBPMが設置されている
  - 要求精度は数100  $\mu\text{m}$ のオーダー  
実現するには個々のBPMの位置誤差を知る必要
  - BPMのゲインは信号伝送、処理回路によって個体差があり、ビームを用いたゲイン較正Beam Based Gain Calibration (BBGC)はBeam Based Alignment (BBA)と合わせて位置補正に有用な手法である
  - ビーム強度による処理回路の設定によってゲインが変動するため、2通りのビーム強度でBBGCを行った
- ◆ 最終的にBBAの結果と合わせ、BPM位置誤差を設置誤差とゲインによる誤差に切り分け、ビーム強度毎のゲイン誤差はBBGCによって補正することで位置補正を行えるようにする